第38卷 第6期
2021年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 6
Nov. 2021

# 蒙古高原交通干线风沙(雪)危害防治技术方案

李生宇[1,2,3]， 范敬龙[1,3,4]， 王海峰[1,2,3]， 崔珂军[1,2,3]， 雷加强[1,3,4]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院新疆生态与地理研究所莫索湾沙漠研究站，新疆 石河子 832000；3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 中国科学院新疆生态与地理研究所塔克拉玛干沙漠研究站，新疆 库尔勒 841000；）

**摘 要：**中蒙俄经济走廊建设是"一带一路"的重要组成部分，将丝绸之路经济带与俄罗斯欧亚大铁路、蒙古国"草原之路"对接联通，对推进区域经济合作发挥着重要作用。区域自然灾害防治是陆路交通干线建设与安全运营的重要关键。中蒙俄经济走廊蒙古高原段在气候变化和人类活动共同作用下，草场退化及风蚀荒漠化问题较为普遍，风沙(雪)害防治则是区域交通干线安全保障的重要课题。结合前人相关的试验理论分析，基于多次大范围实地考察，本文综述了当前蒙古高原交通干线的风沙(雪)害的主要类型及发生机制，预判了路面积沙是未来高等级公路的主要沙害类型；针对现有公路和铁路及未来高等级公路的风沙(雪)危害，结合蒙古高原的生态环境特点，制定了相应防治技术方案和建设性建议，可为蒙古高原段交通干线建设提供科技支撑。

**关键词：**交通干线；风沙(雪)危害；生态修复；防治方案；蒙古高原



交通是指地域间人的沟通与联通(运输)，是人类社会最基本的一种活动[1]，对社会发展进步具有重要作用。运输是一种交通方式，涉及基础设施和运输工具。道路是陆路交通运输的基础设施，并随运输工具进步而发展，现代陆路交通干线主要包括公路和铁路。

交通基础设施在经济发展和文化交流中发挥着重要作用。古代丝绸之路曾促进了沿线国家和地区之间的交流与发展，而未来"一带一路"建设必将更好助力沿线地区发展，而其中交通基础设施的互联互通将发挥极为重要的作用[2]。中蒙俄经济走廊(包括华北通道和东北通道)为"一带一路"倡议的重要组成部分，将丝绸之路经济带与俄罗斯欧亚大铁路、蒙古国的"草原之路"对接联通，可极大推进东北亚地区与其他欧亚大陆地区的区域经济合作[3-4]，目前已启动国际通道建设。

蒙古高原是中蒙俄经济走廊交通干线的重要区段。该区生态脆弱，受气候变化和人为活动的共同影响，生态退化明显，尤其以风蚀沙漠化问题最为突出[5-7]，风沙(雪)害成为影响交通干线建设和运行的重要问题。

中国在沙区退化生态恢复和道路沙(雪)害防治方面取得了诸多成就，如包兰铁路沙坡头铁路[8]、塔里木沙漠公路防沙体系[9-10]、天山公路风吹雪灾害防治[11]等产生了广泛的国际影响。本文基于蒙古高原交通干线沿线的实地调研，并结合我国相关的道路沙(雪)害防治成果，形成了具有区域特色的草原地区交通干线风沙(雪)危害治理方案，可为蒙古高原段交通干线的建设和运营维护提供科技支撑和参考借鉴。

## 1 蒙古高原的自然环境背景

蒙古高原位于欧亚大陆东部，东抵大兴安岭西麓，西达阿尔泰山山脉和萨彦岭，南至阴山山脉，北临萨彦岭、肯特山脉和雅布洛诺夫山脉[12]，包括蒙古全境、俄罗斯南部部分地区、中国内蒙古北部，以及新疆北部部分地区，面积约$272\times10^4$ km$^2$。其是一巨型缓起伏高原，平均海拔约1580 m，地势西高东低，由周围山地向中部高平原缓慢下降，北部和西

**收稿日期：**2021-03-04； **修订日期：**2021-04-29
**基金项目：**中国科学院A类战略性科技先导专项子课题(XDA20030202)；国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2017YFE0109200)；中国科学院关键技术人才项目
**作者简介：**李生宇(1975-)，男，教授级高工，主要从事风沙地貌与荒漠化防治研究. E-mail: oasis@ms.xjb.ac.cn

部多山地，中部和东部为大片丘陵，东南部为广阔戈壁[13-14]。该区受北冰洋和太平洋水汽共同影响，属温带大陆性气候，干旱少雨，冬季寒冷漫长，春季干燥多风，夏季炎热短促，秋季凉爽。杭爱山脉为亚洲内陆流域与外流流域的分界，肯特山脉是北冰洋流域和太平洋流域的分水岭[14]，年均降水量约269 mm，其中北部的萨彦岭、肯特山脉以及内蒙古大兴安岭及其东部平原地区最多，可达300~400 mm，由北向南、由东向西，逐渐减小，西南部最小，仅100 mm左右[13](图1)，气候具有明显的地带性，也从北部和东部的半湿润地带向西南逐渐过渡到半干旱、干旱和极干旱地带。区域植被也呈明显的地带性分布，由北向南、由东向西，依次为森林、森林草原、草甸草原、典型草原、荒漠草原、戈壁荒漠、典型草原、农牧交错带，并相应形成灰色森林土、黑土、黑钙土与栗钙土、棕钙土、灰棕漠土等[14]，植被盖度、植物种类、土壤养分和砂粒含量呈现南北高、中间低的分布格局[15]。

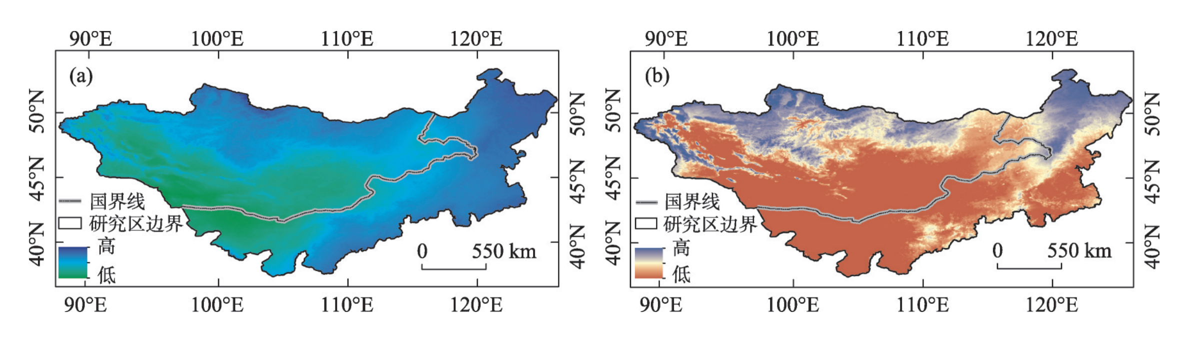
蒙古高原为北半球最大的干旱、半干旱高原，生态环境多样且脆弱[16]，对中国华北乃至整个东北亚地区都有着重要影响[17]。

## 2　区域风蚀沙化问题

蒙古高原由东北向西南，降雨量逐渐减少，植被景观依次为典型草原、荒漠化草原、草原化荒漠、戈壁，整体以草原为主，植被盖度和地上净初级生产力也逐渐降低。蒙古草原纬度较高，春季随着气温回升，西伯利亚冷空气急剧南移，伴随天气过程多发大风，而此时草原还未返绿，地面覆盖物是一年中最少的时期，土壤风蚀速率大，沙尘暴频发，风蚀可达到轻度侵蚀水平[18-20](图2)。

蒙古高原生态环境较脆弱，对气候变化敏感，尤其对降水变化最为敏感。1961—2014年，蒙古高原年平均气温增幅约为同期全球平均气温增幅的两倍(约2 ℃)，年降水量整体呈减少趋势[21-22]，尤其2000年后暖干化明显[21]，夏秋降水明显减少[22]。草原生产力受降水影响较大，在干期有草甸草原→典型草原→荒漠草原的转化模式，产草量大幅下降[18]，草地荒漠化现象明显。

蒙古高原社会生产以畜牧业为主。近30 a来，加上人口、政策、经济等方面人为影响，蒙古高原荒漠化问题更加突出(图3)，草地总面积明显减少[23]。




注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号：GS(2021)5443号，底图无修改。下同。

图1　蒙古高原降水(a)和雪水当量(b)的空间差异

Fig. 1　Spatial differences of precipitation (a) and snow water equivalent (b) on the Mongolian Plateau

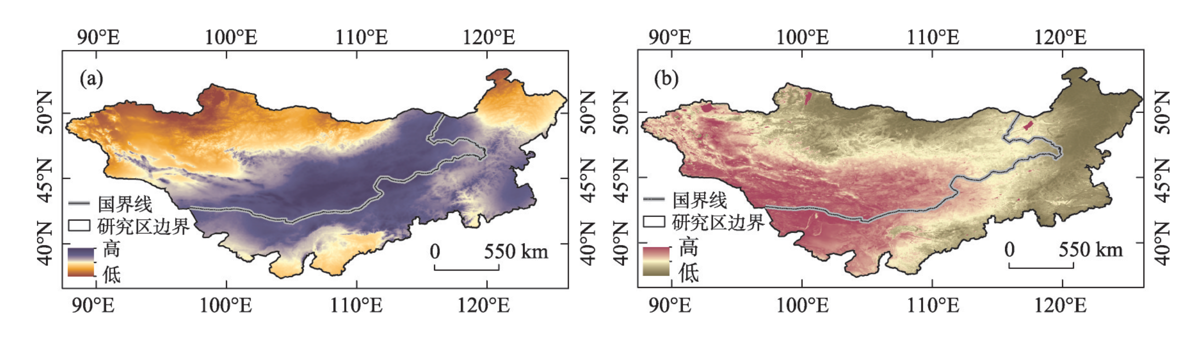



图2　蒙古高原风速(a)和风蚀量(b)的空间差异

Fig. 2　Spatial differences of wind speed (a) and wind erosion (b) on the Mongolian Plateau




图3 蒙古高原人为活动作用下的典型退化下垫面

Fig. 3 Typical degraded underlying surface under human activities on the Mongolian Plateau

自1959年以来，蒙古国经历了两次大规模的农田开垦活动，大量不适宜种植的土地被开垦，到1990年开垦农田面积达到120×10$^4$ hm$^2$；之后，这些耕地由于产量低，而被大面积撂荒，耕地产生强烈的风力侵蚀[24]。20世纪90年代初以来，蒙古国荒漠化日益加剧，2007年72%以上的土地出现了不同程度的荒漠化[24]，主要集中分布在草原、戈壁及其他荒漠地带的城市、苏木、湖泊、河流及矿区周边。

在蒙古高原强劲、频繁的风力作用下，地表有明显的风沙流运动，沙尘天气多发，退化草场风蚀沙化严重，地表机械组成明显粗化。由于地表植被较差，蓄留降雪能力很弱，正常年份难以形成稳定积雪；夏季旱灾（黑灾）与初冬或早春雪灾（白灾）多相继发生[24]，对经济社会造成巨大损失[25]。

## 3 交通干线风沙（雪）危害类型及发生机制

蒙古高原春季多大风，地表植被和积雪覆盖较差，表土干燥，风沙活跃，沙尘天气频发，成为世界沙尘暴的主要策源地[26]；沙尘天气常伴随暴风雪天气，在人员伤亡、交通中断、通信和电力设施损坏等方面危害严重[26-27]。在冬春季节，蒙古高原风吹雪活跃，尤其是在暴风雪天气条件下，风吹雪是造成道路交通中断的重要原因[28-29]。风沙流和风雪流都属于气固两相流[27]，其运动规律也极为相似，对交通干线的致灾机制也类似。

### 3.1 路基环境诱发灾害

在蒙古国实地调查发现，沙尘天气时，风吹沙扬，空气能见度极差，地表有明显的风沙流活动。居民点围墙下多形成大量的风沙堆积，在路基两侧边坡、安全围栏内以及路基涵洞中多形成风沙堆积（图4）。由于一部分风沙（雪）流可以穿越路面（道床）到下风侧，一般情况下路面（道床）不产生积沙（雪），仅因空气能见度差，影响行车安全。但也在路边有微小凸起地形或草丛及路堑路段，由于地形地物对气流的局地强烈扰动，使风速降低，气流搬运能力下降，气流挟沙（雪）卸载堆积，在路肩及路面上形成片状或舌状的风影堆积（图4）[30-31]。

### 3.2 安全护栏诱发灾害

扎门乌德地区调查中发现，在设有波形板路侧



图4 蒙古国居民点及道路路基的风沙（雪）堆积

Fig. 4 Sand and snow deposition in residential area and embankment in Mongolia

护栏的公路上,在路面形成沿路连续分布的条带状的积沙(图5),影响交通安全。此外,相关研究表明[32],随路面积沙厚度增加,路面摩擦力先降低后增加,极大影响行车安全,甚至导致车祸和道路交通中断(图5)。中国沙区高等级公路上也经常出现类似的路面积沙现象[33],其与防沙体系失效导致的流沙掩埋道路不同[34-35],而是风阻较大的波形板护栏(宽28 cm,下、上沿分别距地表45 cm、73 cm,且沿路连续分布)扰动风沙流场,使过境气流被骤然阻滞降速,搬运能力下降,在路面上形成风沙流卸载堆积[35-36]。此外,路基上设置的波形板、水泥墩等路侧护栏或中央隔离带护栏以及防眩遮光片等附属设施,也均可诱发路面积沙。同理,这种大风阻的护栏也极易造成路面积雪[30,37-38],影响交通安全。

目前,蒙古高原交通干线的风沙(雪)危害相对较轻,建成的高等级公路也较少,但伴随未来区域经济社会的发展,将对现有线路进行升级改建,同时也将新建更多高等级公路,亟需提前研究和制定适宜区域环境的交通干线风沙(雪)害防治技术方案。

## 4　交通干线风沙(雪)危害防治技术方案

根据国内交通干线风沙(雪)危害防治技术经验,结合蒙古高原自然环境条件和交通干线建设的实际以及未来发展趋势,形成蒙古高原交通干线风沙(雪)危害防治的技术方案。

### 4.1　基本防治思路

4.1.1　现有道路的风沙(雪)危害治理　蒙古高原现有道路的风沙(雪)危害地段多位于路堑和弯道路段[30-31]。在这些区段,应在道路上风侧区域采取一定人工防护措施,增强对风沙(雪)的拦截能力,以减少在道路上沉积。

蒙古高原自然植被具有一定的自然生态恢复潜力,蒙古国南北纵贯铁路安全围栏内外植被差异(图6),充分表明采取封育措施就能恢复形成相对较好的植被条件[39],并具备一定的拦截风沙(雪)的能力。此外,在严重危害地段可采用各种类型的高立式沙障,以大幅降低近地表风速,形成较强的风沙(雪)拦截能力[40]。

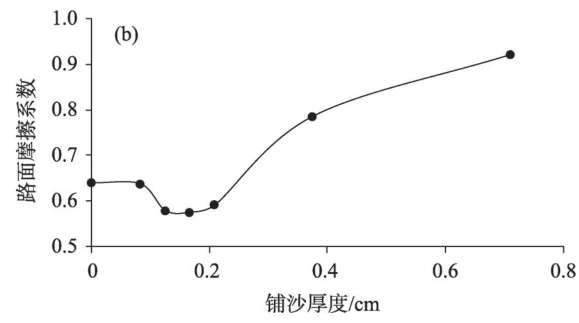



图5　蒙古国扎门乌德地区路面风沙堆积(a)及路面摩擦系数随积沙厚度变化(b,引自文献[32])

Fig. 5　Sand accumulation on highway in Zamyn-Uud in Mongolia (a) and the road friction coefficient variation with sand thickness on road surface (b)



图6　蒙古国南北纵贯铁路安全围栏内外植被差异

Fig. 6　The vegetation difference inside and outside the safety fence along the north-south longitudinal railway in Mongolia

4.1.2　未来新建高等级公路的风沙(雪)危害治理

附属安全设施是高等级公路必不可少的组成部分,据研究,调整护栏设施的结构形式是高等级公路路面风沙(雪)害防治的关键,可以较大幅减小对风沙(雪)流的阻滞作用[33]。缆索式护栏风阻相对较小,目前是常用护栏的重要替代产品[33,37,41]。但鉴于其强度及安全问题,缆索护栏目前仅用作路侧护栏,尚不能用作中央隔离带护栏,其他改进型刚性护栏仍有较大风阻[42-43],还不能有效防治路面沙(雪)害。

根据高等级公路建设规范,路侧护栏的功能是防止车辆驶出路外造成伤害,而中间带和中央分隔

带是用来分隔对向交通;对于整体式断面的高等级公路,必须设置中间带,如中间带宽度≤12 m,则必须设置中央分隔带[44]。因此,在目前技术条件下,采用分离式断面的高等级公路就不用设置中央隔离带,从而可以较好防治路面积沙(雪)危害。

### 4.2 主要防治技术方案

4.2.1 低等级公路防沙(雪)技术方案——机械-植物复合防护 在中蒙俄经济走廊蒙古高原段,由于低等级公路沿线交通便利,放牧活动也非常频繁,牧群和车辆对地表扰动大,沿公路形成了一定宽度的植被退化和风蚀沙化带[26],在荒漠草原地区尤为明显。

蒙古高原植物生长主要依靠夏季降雨,而草本植物根系较浅(30 cm左右),抵御干旱能力较差,在降雨少且晚的年份,返青期延迟[45]。由于区域植被条件较差且多大风,降雪在地表基本难以形成稳定积雪,多以风雪流形式被吹走,堆积在背风地段,在背风地段的公路上常形成公路雪害或沙-雪害[45,31]。

灌木根系较深[46],可利用较深层的土壤水分,抗旱能力较强[47],即使降雨较晚,仍能伸枝展叶。灌木客观上抑制了草原植被的快速退化,具有较好的水土保持作用。灌木也是牧群的重要饲料,特别是白灾期的救命物资[47]。

风雪流也是一种水资源,通过人工措施建立灌木林带,可对风雪流进行收集和生态利用,形成沿公路的防沙(雪)屏障。一般在公路上风侧一定距离处,与公路平行,布设多条通风结构的机械风障;在每条机械风障下风侧栽植数行乡土灌木苗木,建立植物风障,其中靠近机械风障处种植株型较矮小的灌木,远离机械风障处种植株型较高大的灌木。机械风障和植物风障采用分段设置模式,相邻段之间的空白区为牧群通道。为防止风沙(雪)沿牧群通道危害公路,牧群通道宜采用曲折交错布局模式(图7)。

机械风障可降低地表风速,拦截风沙(雪)流,为植物风障生长提供适宜条件。随着植物风障的逐渐生长,其拦截风沙(雪)流的能力也逐渐增强,可以大幅消减公路的过境风沙(雪)流,有效防治公路风沙(雪)害。机械-植物防护体系能够降低近地表风速,改善局地小气候环境,减少土壤水分蒸散,保持较好土壤墒情,通过风传播的植物种子也可被拦截沉积在风障之间[48-49],并萌发生长,促进退化植被恢复。这种以人工作用为主导形成的灌草复合生态系统兼有防沙和防雪功能,且具有较高生产力,而且与公路伴行,交通方便,可为牧群提供风沙(雪)灾害天气的庇护所和应急饲料。研究团队在蒙古国戈壁苏木贝尔省乔伊尔市区的试验区结果也表明,这种模式对过境风沙流和风雪流具有很好的拦截作用,并改善了局地土壤水分状况,促进了生态恢复(图8)。

4.2.2 铁路防沙(雪)技术方案——基于安全护栏的生态型风障 草地退化是风蚀沙漠化发生的重要原因之一。大量研究表明,围封是过牧退化草地生态恢复的重要措施,其通过有效减少食草动物的干扰,来促进退化生态的恢复[50]。围封网是草场围封的常用材料,虽然其网孔尺寸较大(一般20 cm×20 cm),但可以通过拦截风滚草,形成挂草网,具有较好的防护作用,可沿围栏形成风沙(雪)堆积[31],并促进围栏内的植被恢复(图9)。

国内调研多发现,高等级公路安全围栏上多攀附生长着多年生的攀缘植物,这些植物提高了围栏



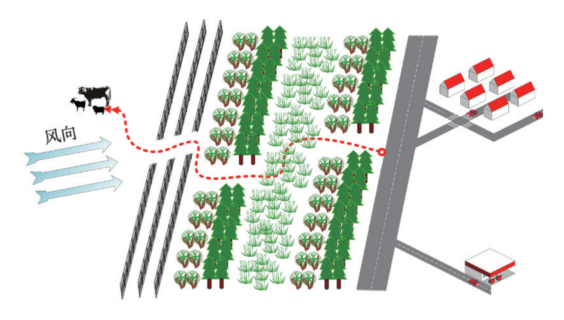



图7 蒙古国赛因山达市公路沿线沙漠化带和公路机械-植物复合防护体系结构布局

Fig. 7 The sandy desertification belt along the highway around Sayinshanda city in southern Mongolia and the structure layout of the mechanical-plant composite protection system of highway

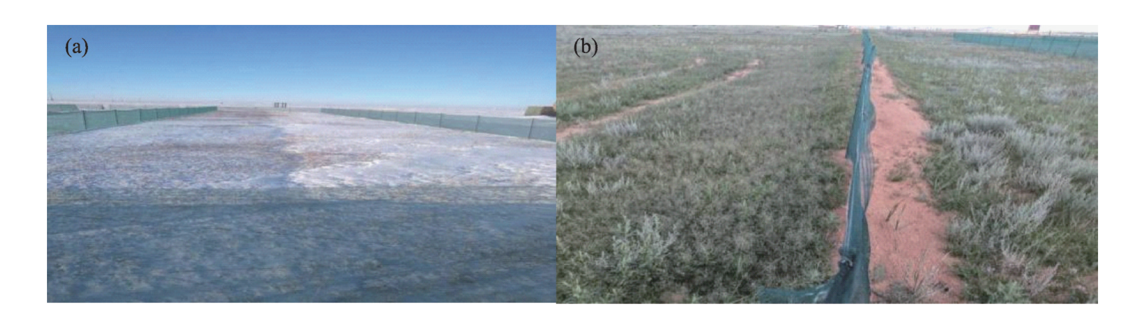


图8　蒙古国戈壁苏木贝尔省乔伊尔市试验区尼龙网风障拦截的雪(a)和沙及恢复的植被(b)

Fig. 8　Snow (a) and sand deposition captured by Nylon net wind barriers and vegetation restoration (b) in the experiment area in Choyr, Gobi Sumbel Province, Mongolia



图9　围封挂草网拦截风雪(a，引自文献[31])和风沙(b)及植被恢复促进作用(c)

Fig. 9　The capturing effect of enclosure net with grass-hanging on windblown snow (a) and sand (b) and vegetation restoration



的阻风系数(图9)，产生较好的防护作用。因此，沿围封网种植多年生攀缘植物可形成较持久的生态风障，增强了围封网的防风功能。

蒙古高原的部分草原地区整体降水较少，且年际变化大，水分条件较差，但可以利用集水措施增加局部的水分收入，以满足攀缘植物需水条件。在围封网内侧基部开沟，土堆于沟旁，整理成土垄；将沟底土壤扒松，用防渗膜覆盖土垄体至沟底(图10)。雨季前，将多年生攀缘植物的种子或插条埋入沟底部土壤中，雨季时降落到塑料膜上的雨水在重力作用下汇流至沟底部，植物萌发生长后，逐渐攀附在围栏上生长(图10)，植物茎叶可降低围栏的透风率，从而形成较好的防风作用，而且随植物生长，防风作用逐年增强。

将本技术方案用于铁路安全围栏改造，可充分利用自然降水资源，有效增加安全围栏的防风功能，更好拦截地表风沙流和风雪流，促进围封内植被恢复，从而更好提升铁路的防沙和防雪能力。该技术方案具有投入低和维护强度小的优点，可增强现有铁路的防沙功能。



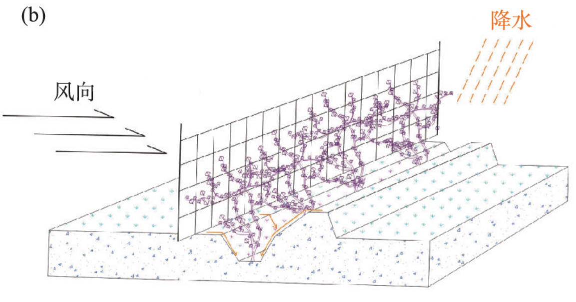



图10　铁路安全护栏上生长的攀缘植物(a)与生态型风障结构模式图(b)

Fig. 10　Climbing plants growing on railway safety barrier (a) and ecotype wind barrier structure model (b)

4.2.3 高等级公路防沙(雪)技术方案——分离式路基+路域植被封育恢复 遵循土地占用少、施工集中、便于运营维护、造价相对较低的原则,高等级公路常采用整体式断面。但在中蒙俄经济走廊的蒙古高原段,地广人稀,除丘陵山地外,多数地区地势起伏不大,可以采用分离式路基断面,为防治路面风沙(雪)危害提供了有利条件。

该方案的具体技术细节如图11。在地势平坦地区(图11a),两条分离式路基并行,无须设置路侧护栏。在地势起伏区,两条道路分别按照合适地貌行进,仅在高路基路段设置缆索式路侧护栏(图11b,图11d)。在地势平坦地区和起伏区,一般在路基两侧应设置围栏,以有效拦截过境风沙(雪)流,并促进退化植被恢复,降低道路的风沙(雪)害风险;至于围封的宽度,可以根据区域风沙环境而调整,风沙(雪)活动强度越大、自然植被越差,则宽度越大,反之则越小。在地形起伏区的路堑路段(图11c,图11e),路基两侧也无须设置护栏,但需要在道路两侧设置高立式风障,将风沙(雪)拦截于远路侧,从而有效降低路堑的积沙(雪)风险。

本方案在高等级公路建设中,舍弃了易诱发风沙(雪)害的波形板护栏,采用其他护栏和分离式路基,可将风沙(雪)流挟沙(雪)拦截于路侧,减少了路面过境风沙(雪)流的强度,也使风沙(雪)流顺利通过路面输移到下风侧,从而根治路面沙(雪)危害,保证交通安全。该方案能很好改善高等级公路的通行环境,防治路面沙(雪)害,还能大幅降低高等级公路的建设投资。国内京新高速部分路段就采用了分离式路基,很好解决了路面沙害问题。

## 5 交通干线风沙(雪)危害防治建议

### 5.1 完善交通干线风沙(雪)危害防治技术规范

在中蒙俄经济走廊蒙古高原段,未来交通干线新建和升级改造时,应充分考虑区域特殊的生态环境特点,高度重视风沙(雪)危害防治,并充实和完善施工技术规范中的相关内容,形成因地制宜的防沙(雪)系列技术措施和方案,以增强交通干线工程建设与区域生态环境的相适性,避免对近地表风场的不利扰动,实现对交通干线风沙(雪)害的科学防治。在具体的防沙(雪)系列技术措施和方案制定时,必须充分考虑区域的降水、植被、沙漠化程度以及局地的地形地貌和道路断面形式等自然和工程条件,尤其高度重视易灾程度强的路堑断面和背风地貌单元的风沙(雪)灾害防治,重点进行防治。

### 5.2 交通干线风沙(雪)灾害防治与区域防灾应急系统建设相结合

交通干线是蒙古高原重要的社会基础设施,也是区域社会自然灾害应急救灾系统的重要依托和保障条件,在救灾物资配送和受灾人员和畜群异地转移安置中发挥了重要作用。虽然蒙古高原交通干线整体风沙(雪)危害相对较轻,但在强沙尘暴、暴风雪这样的灾害性天气中危害较严重,而社会的自然灾害应急救灾能力短板凸显。因此,交通干线

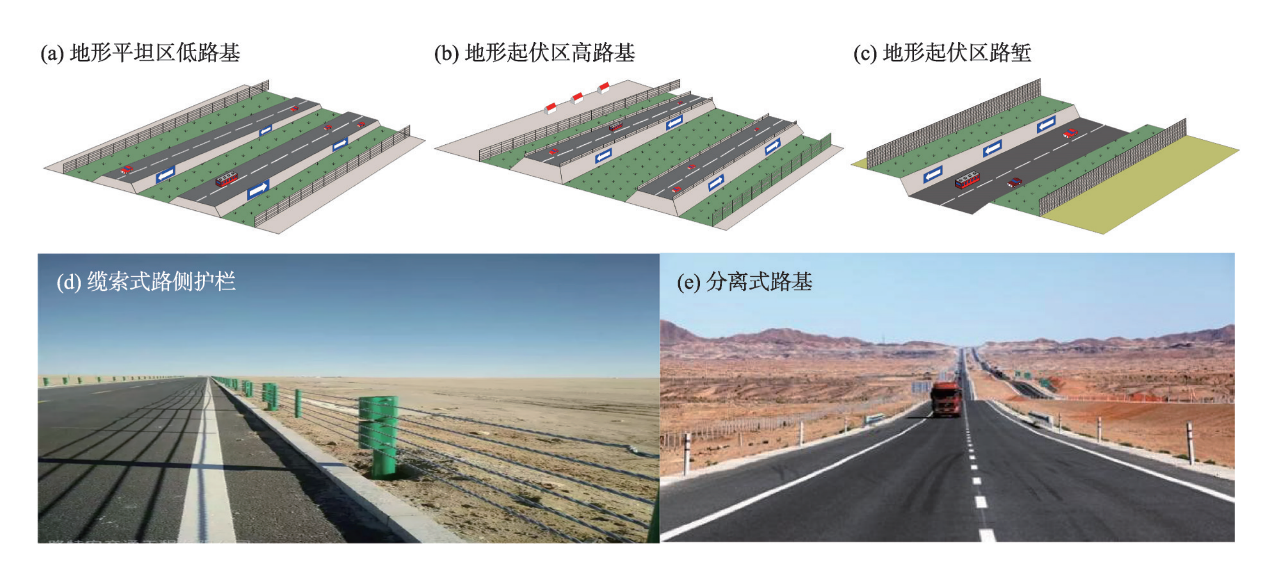



图11 3种地形条件下的分离式路基断面模式

Fig. 11 Separated subgrade cross section constuction models under three types of topographic conditions

风沙(雪)灾害防治与区域防灾应急系统能力提升的目标一致,二者应融合协同发展。

在交通干线风沙(雪)灾害防治中,应高度重视沿线退化生态系统恢复,充分利用自然生态的自我恢复能力。在风雪活动频繁的开阔地区,可因地制宜采取多种措施,将风雪流拦蓄利用与植被恢复有机结合起来,在交通干线沿线建成具有防护功能的灌草复合系统,增强路域生态系统对风沙(雪)的固定和拦截能力。路域生态防沙(雪)系统也可为牧群提供应急避灾场所和必要的饲草。此外,在有灌溉水源条件的地段,可以在道路附近建设人工高产牧草种植基地,并就近建设饲草储备库,为应急救灾提供物资储备。该措施有助于较好提升区域社会的自然灾害应急救灾能力。

**参考文献(References):**


[1] 交通社会学研究课题组. 交通的内涵和社会意义[J]. 武汉交通科技大学学报(社会科学版), 1999, 12(1): 3-5. [Research Group of Transportation Sociology. Connotation and social significance of transportation[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Social Sciences Edition), 1999, 12(1): 3-5. ]

[2] Zhang Chun, Dong Xiaojing, Tseng Chinyin, et al. From ancient Silk Road to contemporary Belt and Road: Different cognition on transportation corridor driven regional development[J]. China City Planning Review, 2020, 29(1): 31-39.

[3] 王海运. 合作共建"中蒙俄经济走廊": 深化战略价值认知, 找准重点着力方向[J]. 俄罗斯学刊, 2017, 7(6): 33-40. [Wang Haiyun. Cooperation and common development of the China-Mongolia-Russian Economic Corridor[J]. Academic Journal of Russian Studies, 2017, 7(6): 33-40. ]

[4] 李超. 中蒙经济合作露出新潜力[N]. 环球时报, 2020-02-29(007). [Li Chao. China-Mongolia economic cooperation shows new potential[N]. Global Times, 2020-02-29(007). ]

[5] 殷玲, 张德平, 成永会, 等. 车辆碾压对沙质草原表土物理力学性质的影响[J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1177-1182. [Yin Ling, Zhang Deping, Cheng Yonghui, et al. Impacts of off-road vehicle traffic on top and mechanical property in the hulunbuir sandy grassland, Inner Mongolia, China [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(5): 1177-1182. ]

[6] Jiang L G, Yao Z J, Huang H Q. Climate variability and change on the Mongolian Plateau: Historical variation and future predictions [J]. Climate Research, 2016, 67(1): 1-14.

[7] John R, Chen J Q, Ouyang Z T, et. al. Vegetation response to extreme climate events on the Mongolian Plateau from 2000 to 2010 [J] Environmental Research Letters, 2013, 8(3): 035033.

[8] 刘媖心. 包兰铁路沙坡头地段铁路防沙体系的建立及其效益[J]. 中国沙漠, 1987, 7(4): 4-14. [Liu Yingxin. The establishment and effect of protecting system along the Bautou-Lanzhou Railway in Shapotot sandy area, Inner Mongolia, China [J]. Journal of Desert Research, 1987, 7(4): 4-14. ]

[9] 韩致文, 王涛, 孙庆伟, 等. 塔克拉玛干沙漠公路风沙危害与防治[J]. 地理学报, 2003, 70(2): 201-208. [Han Zhiwen, Wang Tao, Sun Qingwei, et al. Sand harm in Taklimakan desert highway and sand control[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 70(2): 201-208. ]

[10] 相建民, 李生宇, 买光荣, 等. 塔里木公路防护林生态工程营建与维护[J]. 水土保持通报, 2006, 26(5): 39-42. [Xiang Jianmin, Li Shengyu, Mai Guangrong, et al. Construction and maintenance of the shelter-forest project of the Tarim desert highway[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(5): 39-42. ]

[11] 王中隆. 中国风雪流及其防治研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001. [Wang Zhonglong. Research on Wind and Snow Flow and its Control in China[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2001. ]

[12] 胡云峰, 徐芝英. 蒙古高原地形与植被指数的特征尺度及多尺度耦合关系[J]. 地理科学, 2014, 34(12): 1511-1517. [Hu Yunfeng, Xu Zhiying. Characteristic scales and the multi-scale correlation between DEM and NDVI factors: A case study in the Mongolian Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(12): 1511-1517. ]

[13] 张艳珍, 王钊齐, 杨悦, 等. 蒙古高原草地退化程度时空分布定量研究[J]. 草业科学, 2018, 35(2): 233-243. [Zhang Yanzhen, Wang Zhaoqi, Yang Yue, et al. Research on the quantitative evaluation of grassland degradation and spatial and temporal distribution on the Mongolia Plateau[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(2): 233-243. ]

[14] 刘钟龄. 蒙古高原景观生态区域的分析[J]. 干旱区资源与环境, 1993, 7(增刊): 256-261. [Liu Zhongling. Analysis of landscape ecological region in Mongolian Plateau[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1993, 7(Suppl. ): 256-261. ]

[15] 刘庆生, 刘高焕, 黄翀, 等. 蒙古高原乌兰巴托-丰镇草地样带植被与土壤属性的空间分布[J]. 资源科学, 2016, 38(5): 982-993. [Liu Qingsheng, Liu Gaohuan, Huang Chong, et al. Spatial distribution of vegetation and soil properties on the Ulan Bator-Fengzhen transect on the Mongolian Plateau[J]. Resources Science, 2016, 38(5): 982-993. ]

[16] 李一凡, 王卷乐, 祝俊祥. 基于地理分区的蒙古国景观格局分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(4): 817-827. [Li Yifan, Wang Juanle, Zhu Junxiang. Landscape pattern analysis of Mongolia based on the geographical partitions[J]. Arid Land Geography 2016, 39(4): 817-827. ]

[17] 张雪艳, 胡云锋, 庄大方, 等. 蒙古高原NDVI的空间格局及空间分异[J]. 地理研究, 2009, 28(1): 10-18, 274. [Zhang Xueyan, Hu Yunfeng, Zhuang Dafang, et al. NDVI spatial pattern and its differentiation on the Mongolian Plateau[J]. Geographical Research, 2009, 28(1): 10-18, 274. ]

[18] 秦豪君, 韩永翔. 近56 a蒙古高原草原地上净初级生产力变化[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 914–922. [Qin Haojun, Han Yongxiang. Change of above ground net primary productivity of grassland over the Mongolian Plateau in recent 56 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 914–922. ]

[19] 刘纪远, 齐永青, 师华定, 等. 蒙古高原塔里亚特-锡林郭勒样带土壤风蚀速率的 $^{137}$Cs示踪分析[J]. 科学通报, 2007, 56(23): 2785–2791. [Liu Jiyuan, Qi Yongqing, Shi Huading, et al. $^{137}$Cs tracing analysis of soil wind erosion rate in tariat Xilinguole transect of Mongolian Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 56(23): 2785–2791. ]

[20] 郭学斌. 蒙古草原现状及生态环境保护——蒙古草原生态环境调研[J]. 山西林业科技, 2005, 34(1): 17–19. [Guo Xuebin. Current situation of Mongolia grassland and protection of ecological environment: A survey and research on ecological environment in Mongolia grassland[J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2005, 34(1): 17–19. ]

[21] 秦福莹. 蒙古高原植被时空格局对气候变化的响应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019. [Qin Fuying. Vegetation Patterns and Dynamics in Response to Climate Change Across the Mongolian Plateau[D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2019. ]

[22] 那音太, 秦福莹, 贾根锁, 等. 近54 a蒙古高原降水变化趋势及区域分异特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1253–1261. [Na Yintai, Qin Fuying, Jia Gensuo, et al. Change trend and regional differentiation of precipitation over the Mongolian Plateau in recent 54 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1253–1261. ]

[23] 周锡饮, 师华定, 王秀茹, 等. 蒙古高原近30 a来土地利用变化时空特征与动因分析[J]. 浙江农业学报, 2012, 24(6): 1102–1110. [Zhou Xiyin, Shi Huading, Wang Xiuru, et al. Study on the temporal and spatial dynamic changes of land use and driving forces analysis of Mongolia Plateau in recent 30 years[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2012, 24(6): 1102–1110. ]

[24] 孟雪峰, 孙永刚, 仲夏, 等. 2015年2月21日内蒙古风雪沙尘天气特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 239–246. [Meng Xuefeng, Sun Yonggang, Zhong Xia, et al. A snow and dust weather process in Inner Mongolia on February 21, 2015[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(1): 239–246. ]

[25] 布仁高娃. 蒙古国荒漠化现状、成因及草原畜牧业前景研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2011. [Burengaowa. Research on Current Status, Causes and Prospect of Desertfication in Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2011. ]

[26] 王语懿. 中蒙俄经济走廊建设面临的生态环境问题和绿色开发合作[J]. 东北亚学刊, 2019, 8(3): 69–79, 148. [Wang Yuyi. The environmental issue and cooperation of green development in building the China-Mongolia-Russia Economic Corridor[J]. Journal of Northeast Asia Studies, 2019, 8(3): 69–79, 148. ]

[27] 张云龙, 刘军. 风雪阻断内蒙古中部三条主干道[N]. 新华每日电讯, 2010-01-15(007). [Zhang Yunlong, Liu Jun. Wind and snow blocking three main roads in central Inner Mongolia[N]. Xinhua Daily Telegraph, 2010-01-15(007). ]

[28] 褚建峰. 北方寒冷多风地区公路冬季防雪养护措施[J]. 内蒙古科技与经济, 2010, 4(13): 78, 80. [Chu Jianfeng. Winter snow prevention and maintenance measures for roads in cold and windy areas of North China[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2010, 4(13): 78, 80. ]

[29] 左合君, 闫敏, 刘宝河, 等. 典型草原区芨芨草灌丛积雪形态与滞雪阻雪能力[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 725–731. [Zuo Hejun, Yan Min, Liu Baohe, et al. Snow cover morphology and snow-bound capacity of *Achnatherum splendens* shrub in typical grassland areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 725–731. ]

[30] 邹积宁, 朱光耀. 我国公路风吹雪路基断面形式与雪害形成关系研究[J]. 黑龙江交通科技, 2006, 29(10): 1–2. [Zou Jining, Zhu Guangyao. Research on the relationship between the section form of highway wind blown snow subgrade and snow damage formation in China[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2006, 29(10): 1–2. ]

[31] 张霞. 面向风吹雪雪害防治的公路路基与路侧设计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007. [Zhang Xia. Highway Subgrade and Roadside for Preventing Against Blowing Snow Hazards[D]. Changchun: Jilin University, 2007. ]

[32] 王翠. 巴楚—莎车高速公路路面风沙危害形成机制及防治对策研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020. [Wang Cui. Study on Formation Mechanism and Prevention Countermeasures of Sand Hazards on Bachu Shache Expressway[D]. Urmuqi: Xinjiang University, 2020. ]

[33] 李生宇, 范敬龙, 王海峰, 等. 315国道策勒恰哈桥段风沙灾害成因初步分析与治理对策[J]. 干旱区地理, 2016, 39(4): 754–760. [Li Shengyu, Fan Jinglong, Wang Haifeng, et al. Causes and thoughts of comprehensive control of blown sand disaster at Qiaha Bridge of National Highway 315, in Cele County, Xinjiang, Northwest China[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(4): 754–760. ]

[34] 李生宇, 王德, 雷加强. 塔克拉玛干沙漠腹地路面沙害的空间分布研究[J]. 干旱区地理, 2005, 28(1): 93–97. [Li Shengyu, Wang De, Lei Jiaqiang. Spatial distribution of sand drift disasters on road surface in the hinterland of the Taklimakan Desert[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(1): 93–97. ]

[35] Wang C, Li S, Lei J, et al. Effects of windblown sand damage on desert highway guardrails[J]. Natural Hazards, 2020, 103: 283–298.

[36] Wang C, Li S, Lei J, et al. Effect of the W-beam central guardrails on wind-blown sand deposition on desert expressways in sandy regions[J]. Journal of Arid Land, 2020, 12(1): 154–165.

[37] 黄锦秋. 公路风吹雪雪害防治措施的研究[J]. 黑龙江交通科技, 2019, 42(6): 1–3. [Huang Jinqiu. Study on the prevention and control measures of highway snow disaster[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2019, 42(6): 1–3. ]

[38] 李宝铭. 浅谈公路设计中的风积雪防治[J]. 北方交通, 2018, 31(3): 115–118. [Li Baoming. Brief discussion on prevention of snow

in highway design[J]. Northern Communications, 2018, 31(3): 115–118. ]

[39] 廖晗茹, Indree Tuvshintogtokh, 郭通, 等. 围封对蒙古荒漠草原和高山草原植物群落组成及稳定性的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2020, 56(3): 471–478. [Liao Hanru, Indree Tuvshintogtokh, Guo Tong, et al. Effects of grazing exclusion on the vegetation community composition and the community stability of dry steppe and mountain steppe ecosystems in Mongolia[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020, 56(3): 471–478. ]

[40] 孟和, 郝利军. 对草原地区铁路雪害设计的探讨[J]. 内蒙古科技与经济, 2010, 14(2): 65–66. [Meng He, Hao Lijun. Discussion on snow disaster design of railway in grassland area[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2010, 14(2): 65–66. ]

[41] 郝敬伟. 山区新建高速公路风吹雪病害研究及防治技术[J]. 绿色环保建材, 2019, 6(6): 91–92. [Hao Jingwei. Research and prevention technology of wind snow blowing disease of new expressway in mountainous area[J]. Green Environmental Protection Building Materials, 2019, 6(6): 91–92. ]

[42] 韩石. 德香高速公路路面风积沙严重路段安全护栏选型及处置效果分析[J]. 青海交通科技, 2018, 31(1): 62–66. [Han Shi. Selection and disposal effect analysis of safety guardrail for road surface aeolian sand in De-Xiang Expressway [J]. Qinghai Transportation Science and Technology, 2018, 31(1): 62–66. ]

[43] 张帅, 丁国栋, 高广磊, 等. 风沙区公路防积沙的新型防护栏研究[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(2): 90–97. [Zhang Shuai, Ding Guodong, Gao Guanglei, et al. Study on new highway guardrail for anti-sediment in sand area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(2): 90–97. ]

[44] 中建标公路委员会. 公路工程技术标准(JTG B01–2014)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014. [China Construction Standard Highway Committee. Technical Standard for Highway Engineering (JTG B01–2014)[S]. Beijing: China Communications Press, 2014. ]

[45] 毕哲睿. 蒙古高原雪深时空变化及其对草地植被物候影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2020. [Bi Zherui. Temporal and Spatial Changes of Snow Depth in Mongolia Plateau and its Impact on Grassland Vegetation Phenology[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2020. ]

[46] 王芳. 六种灌木根系空间分布特征及其在土壤生物工程中的应用[D]. 北京: 北京林业大学, 2006. [Wang Fang. Root Spatial Distribution Characteristics of Six Kinds of Shrubs Application in Soil Bioengineering[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006. ]

[47] 白光梅, 赵青, 滕晓华, 等. 灌木饲料林在锡林郭勒盟草原生态建设中的作用[J]. 内蒙古林业调查设计, 2001, 24(3): 10–38. [Bai Guangmei, Zhao Qing, Teng Xiaohua, et al. The role of shrub feed forest in grassland ecological construction in Xilingolameng [J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2001, 24(3): 10–38. ]

[48] 赵廷宁, 曹子龙, 郑翠玲, 等. 平行高立式沙障对严重沙化草地植被及土壤种子库的影响[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(2): 34–37. [Zhao Tingning, Cao Zilong, Zheng Cuiling, et al. Impacts of high-parallel sand-barrier on vegetation and soil seed bank in the seriously desertified grassland [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(2): 34–37. ]

[49] 曹子龙, 赵廷宁, 郑翠玲, 等. 带状高立式沙障防治草地沙化机理的研究[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4): 15–19. [Cao Zilong, Zhao Tingning, Zheng Cuiling, et al. Mechanism of high-banded sand-barriers for controlling grassland desertification[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(4): 15–19. ]

[50] 刘小丹. 封育对退化草场植被恢复的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015. [Liu Xiaodan. The Studies of Effects of Enclosure Measure on Vegetation Restoration in Degraded Grassland: Taking Yanchi County in Ningxia as an Example[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015. ]

# Ecological restoration and control technology schemes for hazards of windblown sand and snow along primary communication lines in the Mongolian Plateau

LI Shengyu[1,2,3], FAN Jinglong[1,3,4], WANG Haifeng[1,2,3], CUI Kejun[1,2,3], LEI Jiaqiang[1,3,4]

(1. National Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Mosuowan Desert Research Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Taklimakan Desert Research Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Korla 841000, Xinjiang, China )

**Abstract:** The construction of the China-Mongolia-Russia Economic Corridor is an important part of the “One Belt and One Road.” initiative and will play an important role in promoting regional economic cooperation by connecting the Silk Road Economic Belt with the Eurasian Railway in Russia and the “Steppe Road” in Mongolia. Construction of land transport arteries is an important part of infrastructure connectivity in the Belt and Road Initiative and regional natural disaster control is key to its construction and safe operation. Under the joint action of climate change and human activities, grassland degradation and wind-erosion desertification are quite common in the Mongolian Plateau. The control of windblown sand and snow damage will be an important topic for regional traffic arteries. Using field studies and data analysis of existing traffic lines across the Mongolian Plateau, this paper systematically reviewed the main types and mechanisms of windblown sand and snow hazards in the Mongolian Plateau traffic arteries and predicted the main types of hazards for future highways. For hazards of windblown sand and snow caused by existing roads, railways, and future high-grade roads, a corresponding prevention and control technical scheme and feasible suggestions were formulated based on ecological environment characteristics of the Mongolian Plateau. This aims to provide scientific and technological support for the construction of traffic trunk lines across the Mongolian Plateau.

**Keywords:** main lines of communication; hazards of windblown sand and snow; ecological restoration; prevention scheme; Mongolian Plateau